

亚北极海区表层沉积物中多种金属离子的富集特征及影响因素

韩同竹^{1,2}, 郑晓玲^{1,2*}, 滕芳^{1,2}, 陈军辉^{1,2}, 王保栋^{1,2}

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 海洋活性物质与现代分析技术国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

摘 要:采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)对白令海北部、楚科奇海和加拿大海盆等亚北极海域表层沉积物中 13 种金属元素(Fe, Mn, Al, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Cr, Ba, Ag, Pb 和 U)的含量进行测定, 结合富集系数(EF)和因子分析结果, 探讨研究区的亚北极海域沉积物中各金属元素的可能影响因素。结果表明, 在楚科奇海和加拿大海盆是 Co, Ni, Cu, Zn, Cr, Ba, Ag, Fe, Mn, Al 和 Pb 高值区, 低值区大多出现在白令海北部; 而 U 和 Cd 的高值区主要出现在楚科奇海北部, 并表现出含量向加拿大海盆逐渐降低的趋势。EF 分析结果显示: 在目标海区的沉积物中 Fe, Mn, Cu, Ag, Ba, Co, Ni 和 Pb 未见富集; 而 Cr, Cd, Zn 和 U 则表现出轻度富集。因子分析对于金属元素的聚类划分结果与通过 EF 计算对于金属元素富集程度的区分结果相吻合, 因此 Al, Mn, Co, Ni, Cu, Ag 和 Pb 可能主要受到陆地岩石和土壤风化的影响; Cr, Cd 和 U 主要受到陆源输入和人类活动影响, 即人类活动是造成亚北极地区沉积物金属元素富集的重要原因; 而 Ba 主要受生物活动影响; Fe 和 Zn 不仅受自然来源和人为来源共同作用, 还可能受到生物活动的影响。

关键词:金属元素; 沉积物; 分布; 因子分析; 北极

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2018)01-0036-11

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2018.01.004

重金属具有毒性、持久性和生物积累等性质, 因此被认为是自然环境中的严重污染物之一^[1]。生活和工业排放的废弃物, 通过地表径流、大气干湿沉降等方式输入到海洋, 导致一些重金属元素在海洋水体中浓度升高, 且最终积累到沉积物中储存起来^[2-4]。海底沉积物作为陆源排放金属元素的汇, 能够反映出该海域的污染状况和历史^[5]。近年来, 在全球变暖背景下, 北极及其周边环境正经历着明显的自然环境变化, 同时又受到人为排放污染物的影响, 尤其是对拥有丰富矿产和渔业资源的白令海北部和楚科奇海^[6], 成为北极、亚北极环境污染研究的热点区域。

国内外对北极周边海域环境中的金属元素已有一定研究: 20 世纪 90 年代, Naidu 等的研究表明, 楚科奇海东北部表层沉积物中重金属的含量低于南大洋深处的罗斯海^[7]; 白令海峡南部海水中 4 种重金属离子的浓度水平也较低, 但 Ga 和 Cr 存在垂直迁移, 在底层出现富集的情况^[8]; 近年来, Cai 等的研究表明, Zn, Cr, Cu, V 和 Pb 等金属元素在白令海、楚科奇海北部及其周围区域表层沉积物中出现高值, 可能受到人为活动的影响^[9]; 而宋冬梅等亦认为人为排放重金属对楚科奇海及白令海北部的环境已造成一定的影响^[10]。综上所述, 北极周边海域环境中的重金属含量有增加的趋势, 然而, 北极周边海域沉积物

收稿日期: 2017-11-14

资助项目: 南北极环境综合考察与评估专项——南极周边海域海洋化学与碳通量调查(CHINARE2016-01-04); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——近海环境中脂溶性毒素、分布特征与生物有效性研究(2016S02)

作者简介: 韩同竹(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋环境化学方面研究。E-mail: hantz@fio.org.cn

*** 通讯作者:** 郑晓玲(1962-), 女, 研究员, 博士, 主要从事极地海洋化学与大气化学方面研究。E-mail: zxl@fio.org.cn

(王佳实 编辑)

中不同金属元素的潜在来源和影响因素,目前还未探明。阐明该海域沉积物中各金属元素的分布和潜在影响因素,对了解北极及其周边海域沉积物中重金属元素的现状以及进一步了解人为活动对北极周边环境的影响有重要意义。

本研究以白令海、楚科奇海和加拿大海盆西北部等亚北极海区为目标研究海区,通过对表层沉积物中 13 种金属元素(Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Cr, Ba, Ag, Pb, Fe, Mn, Al 和 U)的含量测定,探究金属元素在该海域表层沉积物中的空间分布特征、地球化学特征,并考察各金属元素之间的来源差异以及在该海域沉积物中的富集情况。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014-07-09 参加我国第 6 次北极科学考察,获得了位于亚北极区域白令海、楚科奇海、楚科奇海台及加拿大海盆西北部海域的表层沉积物样品;使用箱式采样器采集表层沉积物样品(0~10 cm),获得样品后立即置于-20℃冰柜中冷冻保存,共采集了 21 个样品,采样站位如图 1。

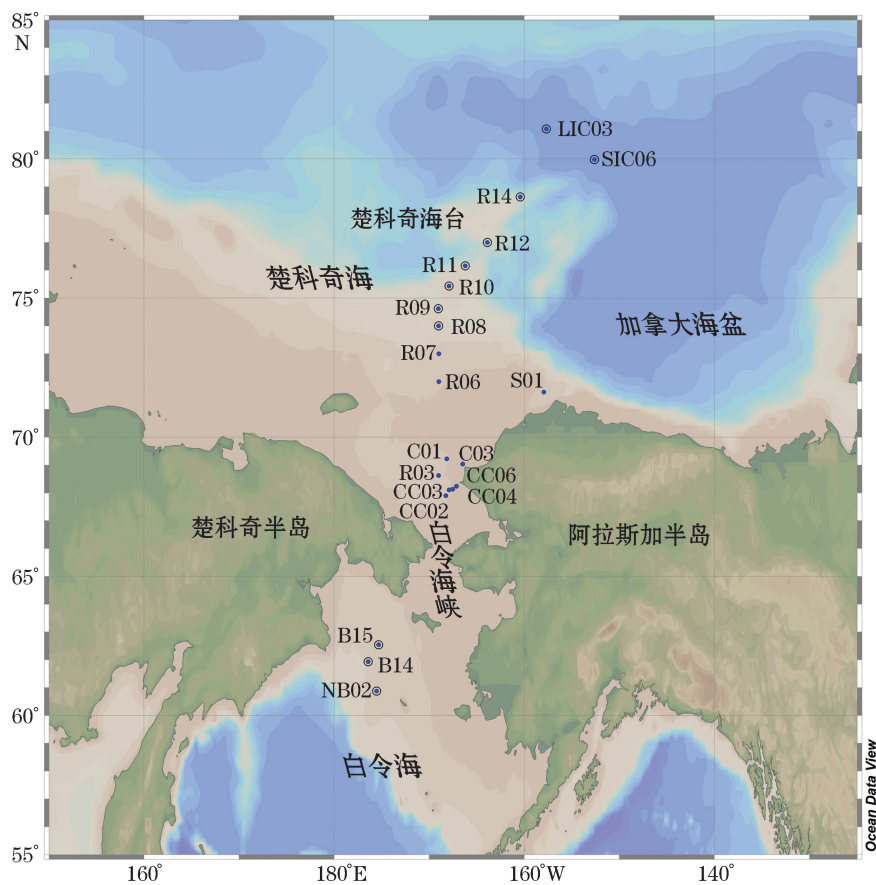


图 1 采样站位图

Fig.1 Location map of the sampling sites

1.2 金属元素分析

首先,使用真空冷冻干燥机(LABCONCO 公司,美国)对沉积物样品进行冷冻干燥处理;其次,准确称取 0.20 g 沉积物干粉样品,置于聚四氟乙烯(PTFE)消解罐中,加入 6.0 mL 浓 HNO₃(分析纯,Merck,德国)、2 mL H₂O₂(优级纯,Merck,德国);然后,在 MARs 密闭微波消解仪(CEM 公司,美国)中消解;最后,用超纯水(Milli-Q 超纯水处理系统,美国,Milipore 公司,18.2 MΩ)溶解定重至 20.0 g,即为待测溶液。

采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国,Agilent 7500a)测定待测溶液中各金属元素含量。首先利用调谐液对仪器进行调谐,使仪器的灵敏度、分辨率、氧化物、双电荷达到分析测定要求,具体 ICP-MS 工作参数详见表 1。根据表 1 的工作参数,测定沉积物中各金属元素含量。各金属多元素混合标准溶液 10 μg·mL⁻¹ 和内标溶液 10 μg·mL⁻¹ (使用前用体积分数 5% 的 HNO₃ 稀释成 100 μg·L⁻¹) 均购自美国 Agilent 公司。

表 1 ICP-MS 工作参数
Table 1 Working parameters of ICP-MS

项 目	参 数	项 目	参 数
射频功率	1 350 W	样品提升速率	1.0 mL·min ⁻¹
采样深度	6.3 mm	分析模式	quantity
等离子体气流速	16.0 L·min ⁻¹	扫描模式	jump
辅助气流速	1.00 L·min ⁻¹	样品驻留时间	30 ms
载气流速	1.15 L·min ⁻¹	数据采集重复	3
采样锥	1.0 mm	积分时间	0.100 0 s
截取锥	0.8 mm		

注:空白处无数据

1.3 因子分析

使用 SPSS 软件(Statistical Product and Service Solutions, v22.0, IBM 公司)中的皮尔森相关分析(Pearson Correlation Analysis)和因子分析(Factor Analysis),对已测定的金属元素之间存在的内在相关关系进行研究^[11]。使用因子分析,分析多种金属元素之间的相关联系,并在 Kaiser 标准化正交旋转的基础上进行“因子旋转”,使每一个主因子尽可能与最少的变量存在相关关系,从而得到新的各因子矩阵,保证各金属要素得到更清晰的解释。因子分析得到的因子,可以用来评价各金属要素的控制作用。本研究在 $P<0.05$ 的条件下,进行相关分析和因子分析。

1.4 富集系数(EF)的计算

富集系数(Enrichment Factor, EF)选择表生过程中地球化学性质稳定的元素作为参考元素(或称标准化元素),来判断金属元素的富集程度,是定量评价金属富集程度与富集来源的重要指标^[12-13]。其计算方法为

$$EF = \frac{C_n / C_{ref}}{B_n / B_{ref}}, \tag{1}$$

式中, C_n , C_{ref} 分别代表沉积物中重金属含量及参比元素含量; B_n , B_{ref} 分别为重金属背景值及参比元素背景值。

2 结果与讨论

2.1 各金属元素含量与分布

亚北极海区表层沉积物中的 13 种金属元素包括 10 种微量金属元素(Co,Ni,Cu,Zn,Cd,Cr,Ba,Ag,Pb 和 Mn)和 3 种常量元素(Fe 和 Al)以及放射性元素(U),测定结果见表 2。

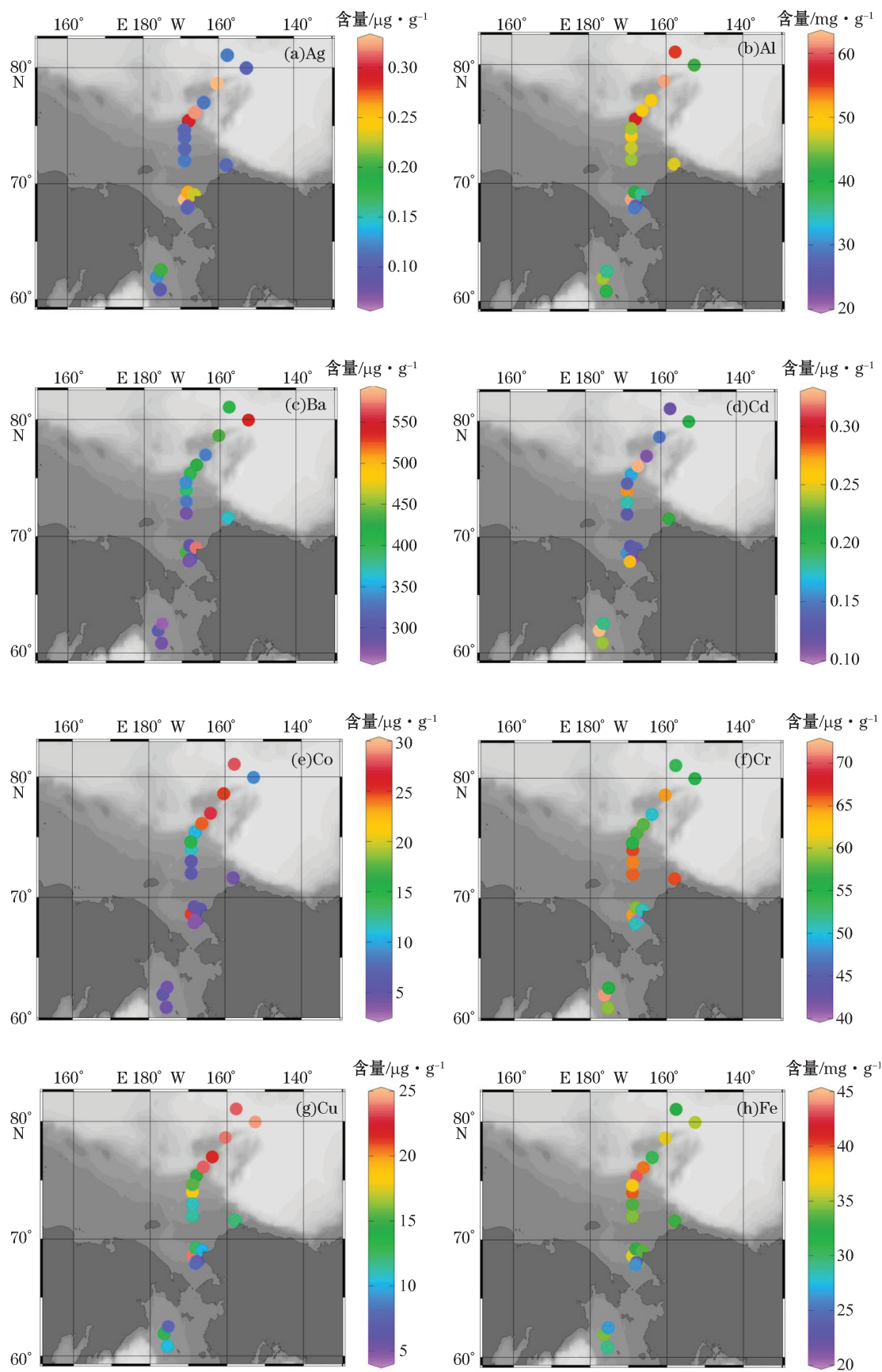
表 2 沉积物中 13 种金属元素的含量
Table 2 Concentrations of 13 metal elements in the sediments

项 目	Al/ mg · g ⁻¹	Fe/ mg · g ⁻¹	Mn/ μg · g ⁻¹	Cr/ μg · g ⁻¹	Co/ μg · g ⁻¹	Ni/ μg · g ⁻¹	Cu/ μg · g ⁻¹	Zn/ μg · g ⁻¹	Cd/ μg · g ⁻¹	Ag/ μg · g ⁻¹	Ba/ μg · g ⁻¹	Pb/ μg · g ⁻¹	U/ μg · g ⁻¹
平均值	43.67	33.45	306.1	57.47	10.95	24.26	14.37	85.77	0.178	0.167	373.3	12.8	12.11
标准偏差	10.54	4.69	177.7	7.54	8.94	9.34	6.57	34.66	0.071	0.089	94.46	6.10	2.76
最大值	61.67	43.02	681.6	71.22	27.72	43.27	24.22	152.6	0.328	0.328	584.4	22.12	17.4
最小值	21.79	23.24	81.1	40.00	3.25	13.70	4.86	22.83	0.105	0.069	264.8	4.13	6.77
中位数	45.43	34.16	254.8	57.16	5.60	20.04	12.38	83.88	0.155	0.116	337.8	11.28	12.06

实验结果表明,在亚北极表层沉积物中 Co,Ni,Cu,Zn,Cr,Ba,Ag,Fe,Mn,Al 和 Pb 的含量,表现出相似的平面分布特征,即高值区主要出现在楚科奇海北部和加拿大海盆西北部的区域,而低值区主要出现在白令海北部和楚科奇海南部区域(图 2),这与宋冬梅等^[9]和 Cai 等^[10]的研究结果一致,对于 Cd 和放射性元素 U,在白令海北部和楚科奇南部含量都较高,含量向加拿大海盆西北部逐渐降低。这样的分布特征可能是由于携带金属离子的河水汇入楚科奇海,被陆源沉积下来的粉砂和黏土吸附^[14],并最终沉积于楚科奇海,使楚科奇海沉积物中金属含量增加,又由于楚科奇海向加拿大海盆的海底深度变化较大(图 2),造成沉积物水平迁移,使加拿大海盆西北部中某些金属离子的含量略大于楚科奇海;白令海峡水流较急,可将白令海水体中的金属离子通过白令海峡输送到楚科奇海及更远区域^[15],仅一小部分在白令海北部沉积,这可能是造成白令海北部区域金属含量较低的原因(图 2)。加拿大的育空河沉积物的历史迁移印证了本研究中各金属的分布趋势^[15]。育空河直接注入白令海,其中有一部分育空河沉积物,随着北向的阿拉斯加沿岸流,通过白令海峡进入楚科奇海,并最终沉积到楚科奇海及加拿大海盆的沉积物中^[15-16]。总之,本研究区域沉积物中大部分金属元素的分布特征存在相似之处,可能是白令海北部、楚科奇海和加拿大海盆周边区域陆源输入和采样区域水文条件驱动的共同作用的结果。

2.2 金属元素在沉积物中的富集系数

沉积物中金属可能受自然风化来源或人为活动影响,为探讨各金属元素不同来源的富集状况,本研究计算了白令海北部、楚科奇海及加拿大海盆西北部表层沉积物中各种金属元素的富集系数(EF)(表 3)。计算 EF 时,采用从陆地向海洋稳定迁移的 Al 作为标准化元素^[17],考虑到区域的差异,背景值尽量采用当地背景值或全球土壤背景值,但由于个别金属元素,尤其是 Ag 和 U 在该研究海域的背景值缺失,只能使用其他海域的背景值。其中,Mn,Fe,Cu,Cd 和 Pb 采用楚科奇海域柱状样底端的各金属背景值^[18];Cr,Co,Ni 和 Zn 引用宋冬梅等研究北极区域的背景值^[10];Al 和 Ba 采用全球土壤平均值^[19];Ag 是采用 1848 年普吉特海湾沉积物柱状样岩心背景值^[20];U 采用非洲陆架区的 U 的柱状样背景值^[21]。为了便于区分金属的富集程度,



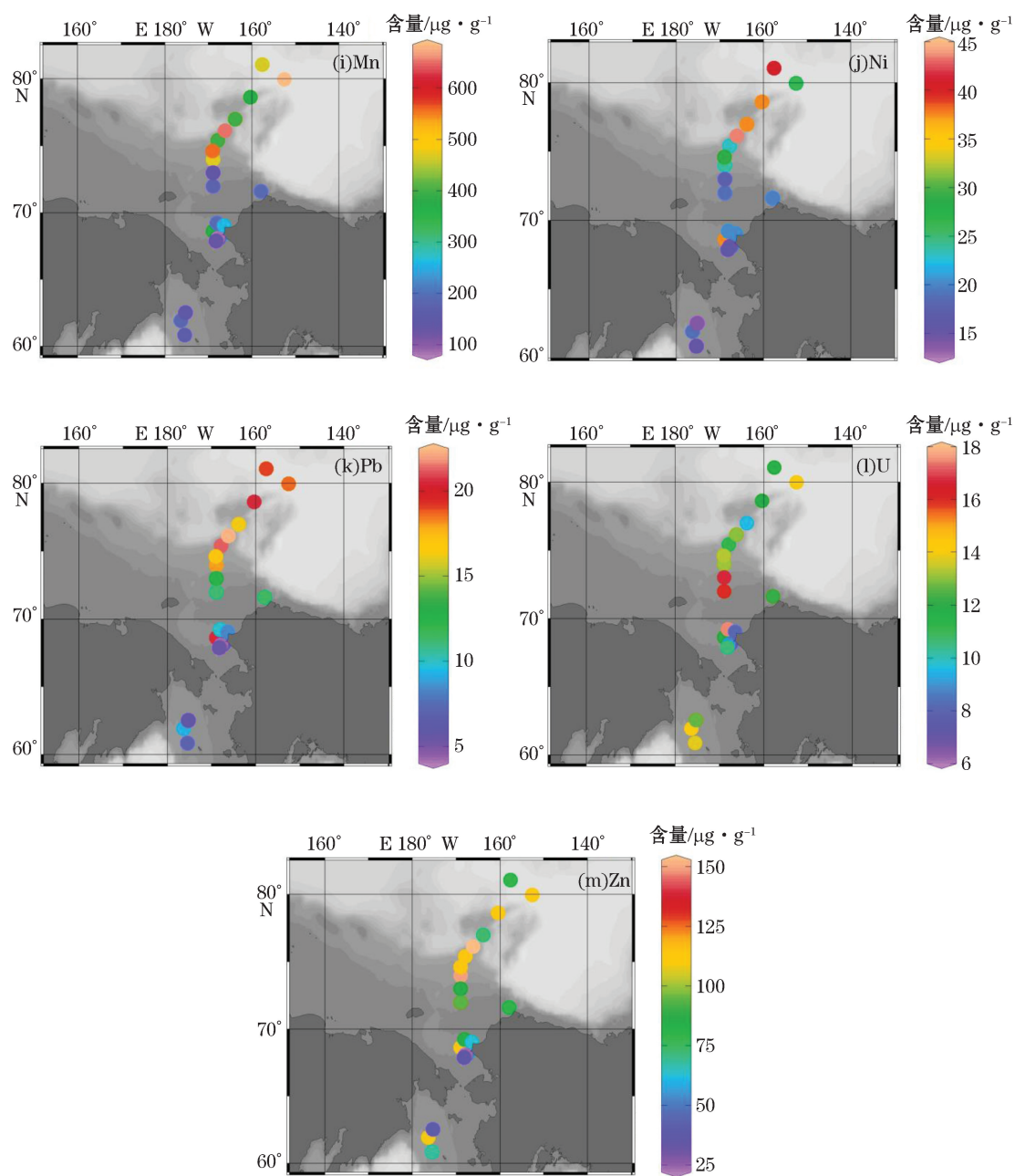


图 2 沉积物中 13 种金属元素分布图

Fig.2 Distributions of 13 metal elements in the sediments

本研究将 EF 大致分为两类,即 $EF < 1.5$,为不富集; $2 < EF < 1.5$,为轻度富集。从表 3 中可以看出,Fe,Co, Mn,Ni,Cu,Zn,Ag,Cd,Ba 和 Pb,根据 EF 的平均值或中位数低于 1.5,表现出不富集程度;而 Cr,Zn,Cd 和 U 的 EF 平均值和中位数都高于 1.5,则表现出轻度富集程度。

表 3 各种金属富集系数分析结果
Table 3 The results of enrichment factors (EFs) analysis of thirteen metal elements

金 属	背景值	富集系数(EF)			富集程度
		平均值	标准偏差 SD	中位数	
Al	69.3 mg • g ⁻¹	—	—	—	—
Fe	31 mg • g ⁻¹	1.58	0.31	1.51	不富集
Cr	60 μg • g ⁻¹	1.58	0.29	1.61	轻度富集
Mn	340 μg • g ⁻¹	1.40	0.72	1.21	不富集
Co	10 μg • g ⁻¹	1.59	1.04	1.05	不富集
Cu	13 μg • g ⁻¹	1.69	0.53	1.48	不富集
Zn	80 μg • g ⁻¹	1.66	0.49	1.57	轻度富集
Ni	26.8 μg • g ⁻¹	1.43	0.37	1.47	不富集
Ag	0.15 μg • g ⁻¹	1.77	0.81	1.25	不富集
Cd	0.16 μg • g ⁻¹	1.85	0.81	1.62	轻度富集
Ba	445 μg • g ⁻¹	1.40	0.51	1.16	不富集
Pb	13 μg • g ⁻¹	1.49	0.48	1.30	不富集
U	11 μg • g ⁻¹	1.81	0.46	1.71	轻度富集

注：“—”为此处无数据

2.3 因子分析探究金属的可能影响因素

本研究中,13 种金属元素含量数据的特征符合因子分析的要求(KMO 检验>0.7,Bartlett’s 检验的 sig.<0.05),适合因子分析条件。通过表 4 中各金属元素之间的相关系数矩阵,计算相关矩阵的特征值和特征向量,得到表 5 中各因子的特征值和贡献率,用于探究白令海北部、楚科奇海及加拿大海盆西北部表层沉积物中多种金属元素之间的地球化学特征,并为该海域的各金属污染成因的解释提供一定的理论依据^[22]。

首先,分析各金属元素之间的相关性。从表 4 可以看出,Al 与各金属 Cr,Fe,Co,Ni,Cu,Zn,Ag,Pb 之间都存在显著相关关系;Mn 与 Fe,Co,Ni,Cu,Zn,Pb 之间都存在显著相关关系,相关系数都在 0.62 以上;Fe 与 Al,Cr,Mn,Zn,Pb 之间也都存在显著相关关系;与此同时,各金属之间也存在相关性,比如 Cu 与 Co,Ni,Zn,Pb 之间各自存在相关性,Cr,Cd 和放射性元素 U 之间也存在相关性。以相关性分析结果为基础,相关性较好的元素可能在成因和来源上有一定的关联^[5],因此,这些存在相关性的金属可能具有相似的地球化学特征或物质来源(表 4)。然后对该海域表层沉积物的多种金属进行因子分析,取特征值大于 1.1 的 3 个因子(累积方差为 78.81%),经过最大方差旋转,得到旋转后各因子的得分情况见表 5。因子 1 的方差贡献为 51.49%,代表的元素组合为 Al,Mn,Co,Ni,Cu,Ag 和 Pb;因子 2 的方差贡献为 18.32%,代表的元素组合为 Cr,Cd 和 U;因子 3 的方差贡献为 8.999%,代表的元素为 Ba(表 5)。值得注意的是 Fe 和 Zn 在这 3 个因子中的贡献比较平均,对各因子的贡献都在 0.4 以上(表 5)。

上述因子分析结果,与 2.2 节的富集系数结果相吻合,即因子 1 中存在显著相关关系的 Al,Mn,Co,Ni,Cu,Ag,Pb 元素,其富集系数结果均没有表现出富集,说明这些金属受到的影响程度相同且可能具有相似的来源;因子 2 中的 Cr,Cd 和 U,其富集系数结果均表现出轻度富集,可能是由于受到陆源输入和人为活动的影响(表 3,表 5)。也就是说,分析对于金属元素的聚类划分结果与通过 EF 计算对于金属元素富集程度的划分结果相一致,这说明金属的富集程度可能与其相似的来源有关。因此,结合富集系数和因子分析结果,探讨这些金属的存在和分布在本研究中亚北极地区可能的影响因素。

金属元素 Al,因其从陆地到海洋的传递过程中相对稳定,能够作为海洋沉积物中陆源成分的指标^[23],由此可以推断,因子 1 中的元素组合 Co,Ni,Cu,Mn,Al 和 Pb 可能属于自然来源,都来源于陆地岩石和土壤风化产物(表 5)。而放射性元素 U 主要来自大陆,其绝大部分由河流输入入海,之后又较集中地沉积在大陆

架区^[24],主要来自于陆源输入和人为活动,比如核燃料或电子管制造业,可作为人为来源的指标^[24]。因此,因子 2 中的元素组合 Cr,Cd 和 U 可能都属于人为来源,都受到陆源输入和人为活动的影响(表 5)。据文献研究,沉积物的微量元素 Ba 主要为生物成因,与海洋生物活动有关^[25],可作为反演海洋古生产力的指标^[27]。Ba 也可能受到海底热液沉积的影响,但其影响在该研究区域可以忽略不计^[26]。因此,因子 3 中的 Ba 在该研究海域中主要受生物活动的作用。另外,海洋中 Fe 的氧化物可以吸附痕量金属或与痕量金属发生共沉淀,最终累积到沉积物中,因此 Fe 与多种金属存在相关关系,其中与 Zn 的相关性最高^[28](表 4)。同时 Fe 和 Zn 在海水中是浮游植物生长的必需痕量金属元素,参与生物的新陈代谢过程。从因子分析结果可以看到,Fe 和 Zn 表现出对 3 个因子都有较高贡献,这说明 Fe 和 Zn 可能受到自然来源和人为来源共同作用,也会受到生物活动的影响(表 5)。

表 4 沉积物中多种金属元素之间的相关系数矩阵
Table 4 Correlation coefficient matrix among thirteen metal elements in the sediment

	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ag	Cd	Ba	Pb	U
Al	1	0.636 **	0.504 *	0.642 **	0.722 **	0.698 **	0.800 **	0.731 **	0.490 *	0.086	0.187	0.864 **	0.345
Cr		1	0.027	0.479 *	0.067	0.072	0.299	0.622 **	0.188	0.464 *	−0.093	0.335	0.643 **
Mn			1	0.623 **	0.646 **	0.747 **	0.815 **	0.726 **	0.230	0.146	0.531 *	0.827 **	0.060
Fe				1	0.336	0.432	0.509 *	0.852 **	0.461 *	0.159	0.446 *	0.725 **	0.157
Co					1	0.970 **	0.860 **	0.484 *	0.418	−0.083	0.238	0.793 **	−0.073
Ni						1	0.891 **	0.571 **	0.450 *	−0.025	0.387	0.828 **	−0.048
Cu							1	0.720 **	0.387	0.138	0.365	0.911 **	0.203
Zn								1	0.368	0.428	0.301	0.822 **	0.438 **
Ag									1	0.989	0.208	0.487 *	−0.016
Cd										1	−0.133	0.109	0.307
Ba											1	0.353	−0.318
Pb												1	0.218
U													1

注: * 为存在相关性; ** 为显著性相关;空白处无数据

表 5 最大方差旋转后,因子分析信息提取表
Table 5 Table of factor analysis information extraction after maximum varimax rotation

金 属	因子 1	因子 2	因子 3	贡献率
Al	0.820	0.434	0.082	0.867
Cr	0.179	0.893	−0.021	0.829
Mn	0.659	0.063	0.592	0.789
Fe	0.414	0.444	0.665	0.811
Co	0.966	−0.132	0.036	0.951
Ni	0.943	−0.096	0.195	0.936
Cu	0.904	0.178	0.236	0.904
Zn	0.560	0.640	0.476	0.949
Ag	0.504	0.078	0.168	0.289
Cd	−0.103	0.657	0.146	0.464
Ba	0.189	−0.234	0.842	0.799
Pb	0.869	0.263	0.344	0.942
U	0.101	0.792	−0.282	0.716
特征值	6.694	2.382	1.170	—
方差/%	51.490	18.324	8.999	—
累积方差/%	51.490	69.814	78.813	—

注:“—”代表无数据

3 结 论

亚北极海域表层沉积物中多种金属元素的分布特征,表现为楚科奇海北部和加拿大海盆西北部含量高,白令海北部和楚科奇海南部含量较低,可能与整个研究区域的陆源输入情况和水文状况有关,即白令海北部的大体积水携带金属元素,通过白令海峡,最终沉积于楚科奇海。亚北极海域表层沉积物中金属元素富集系数(EF)分析结果:Cr,Zn,Cd和U表现轻度富集;Fe,Co,Mn,Ni,Cu,Zn,Ag,Cd,Ba和Pb元素,在本研究海域没有发生富集。结合因子分析结果,与EF的结果相似,即亚北极海域表层沉积物中Co,Ni,Cu,Mn,Al,Pb可能属于自然来源,来源于陆地岩石和土壤风化产物;Cr,Cd,U可能都属于人为来源,受到陆源输入和人为活动的影响较大;Ba受到生物活动影响;Fe和Zn不仅受到自然来源和人为来源共同影响,还受到生物活动的影响。

参考文献(References):

- [1] TAM N F, WONG Y S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps[J]. Environmental Pollution, 2000, 110(2): 195-205.
- [2] NORISUYE K, EZOE M, NAKATSUKA S, et al. Distribution of bioactive trace metals (Fe, Co, Ni, Cu, Zn and Cd) in the Sulu Sea and its adjacent seas[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2007, 54(1-2): 14-37.
- [3] SUNDA W G. Trace metal interactions with marine phytoplankton [J]. Biological Oceanography, 1989, 6(5-6): 411-442.
- [4] ZHU D X, NI S B. Biogeochemistry and biological effects of chromium[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2004, 11(4): 1-9. 朱定祥,倪守斌. 铬的生物地球化学及生物效应[J]. 广东微量元素科学, 2004, 11(4): 1-9.
- [5] SONG Y G, YU C, ZHANG Y F, et al. Geochemical characteristics of trace metals in sediments of Liaodong Bay based on multivariate statistical analysis[J]. Research of Environmental Sciences, 2016, 29(5): 692-699. 宋永刚, 于彩芬, 张玉凤, 等. 基于多元统计分析的辽东湾沉积物痕量金属地球化学特征[J]. 环境科学研究, 2016, 29(5): 692-699.
- [6] Special Office of the National Oceanic Bureau. Investigation of marine chemistry and carbon flux in the Arctic Sea[M]. Beijing: China Ocean Press, 2016: 365. 国家海洋局极地专项办公室. 北极海域海洋化学与碳通量考察[M]. 北京: 海洋出版社, 2016: 365.
- [7] NAIDU A S, BLANCHARD A, KELLEY J J, et al. Heavy metals in Chukchi Sea sediments as compared to selected circum-arctic shelves[J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, 35(7-12): 260-269.
- [8] YAO Z W, JIANG G B, CAI Y Q, et al. The status of persistent organic pollutants and heavy metals in the surface water of the Arctic region[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(15): 1196-1200. 姚子伟, 江桂斌, 蔡亚歧, 等. 北极地区表层海水中持久性有机污染物和重金属污染的现状[J]. 科学通报, 2002, 47(15): 1196-1200.
- [9] CAI M H, LIN J, HONG Q Q, et al. Content and distribution of trace metals in surface sediments from the northern Bering Sea, Chukchi Sea and adjacent Arctic areas[J]. Marine Pollution Bulletin, 2011, 63(5-12): 523-527.
- [10] SONG D M, FENG W Q, LIU Y G, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in the Bering Sea, the Chukchi Sea and the Canada Basin [J]. Chinese Journal of Polar Research, 2016, 28(3): 346-352. 宋冬梅, 冯文强, 刘焱光, 等. 白令海、楚科奇海、加拿大海盆沉积物重金属潜在生态风险评价[J]. 极地研究, 2016, 28(3): 346-352.
- [11] FIELD A. Discovering statistics using IBM SPSS statistics[M]. London: SAGE Publication, 2013.
- [12] CHEN M, CAI Q Y, XU H, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(06): 1069-1074. 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1069-1074.
- [13] ZHANG X Z, BAO Z Y, TANG J H. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals[J]. Geological Science and Technology Information, 2006, 25(1): 65-72. 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. 地质科技情报, 2006, 25(1): 65-72.
- [14] NAIDU A S, MOWATT T C. Source and dispersal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental shelf areas off Alaska[J]. Geological Society of America Bulletin, 1983, 94(7): 841-854.
- [15] NELSON H, CREAGER J S. Displacement of Yukon-derived sediment from Bering Sea to Chukchi Sea during Holocene time[J]. Geology, 1977, 5(3): 141-146.

- [16] TANG Y X, JIAO Y T, ZOU E M. A preliminary analysis of the hydrographic features and water masses in the Bering Sea and the Chukchi Sea[J]. Chinese Journal of Polar Research, 2001, 13(1): 57-68. 汤毓祥, 矫玉田, 邹娥梅. 白令海和楚科奇海水文特征和水团结构的初步分析[J]. 极地研究, 2001, 13(1): 57-68.
- [17] BUAT-MENARD P, CHESSELET R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 42(3): 399-411.
- [18] TREFRY J H, TROCINE R P, COOPER L W, et al. Trace metals and organic carbon in sediments of the northeastern Chukchi Sea [J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2014, 102(4): 18-31.
- [19] WU Y, HOU X, CHENG X, et al. Combining geochemical and statistical methods to distinguish anthropogenic source of metals in lacustrine sediment: A case study in Dongjiu Lake, Taihu Lake catchment, China[J]. Environmental Geology, 2007, 52(8): 1467-1474.
- [20] BLOOM N S, CRECELIUS E A. Distribution of silver, mercury, lead, copper and cadmium in central Puget Sound sediments[J]. Marine Chemistry, 1987, 21: 377-390.
- [21] VEEH H H, CALVERT S E, PRICE N B. Accumulation of Uranium in sediments and phosphorites on the south west African Shelf [J]. Marine Chemistry, 1974, 2(3): 189-202.
- [22] LAU S S, LANE S N. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: a long-term study[J]. Science of the Total Environment, 2002, 288(3): 167-181.
- [23] HU N J, LIU J H, HUANG P, et al. The distribution and risk assessment of metals in surface sediments of the Liaodong Bay in the Bohai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2012, 34(2): 92-100. 胡宁静, 刘季花, 黄朋, 等. 渤海莱州湾表层沉积物中金属元素分布及环境质量[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 92-100.
- [24] ZHAO Y Y. Geochemistry of uranium in sediments of Bohai Gulf, China[J]. Geochimica, 1980, 9(1): 101-105. 赵一阳. 中国渤海沉积物中铀的地球化学[J]. 地球化学, 1980, 9(1): 101-105.
- [25] HU N J, SHI X F, HUANG P, et al. Distribution of metals in surface sediments of Liaodong Bay, Bohai Sea[J]. China Environmental Science, 2010, 30(3): 380-388. 胡宁静, 石学法, 黄朋, 等. 渤海辽东湾表层沉积物中金属元素分布特征[J]. 中国环境科学, 2010, 30(3): 380-388.
- [26] CAI G Q, QIU Y, PENG X C, et al. Geochemical characteristics of barium in surface sediments from the southwestern area of South China Sea[J]. Geoscience, 2010, 24(3): 560-569. 蔡观强, 邱燕, 彭学超, 等. 南海西南海域表层沉积物中微量元素 Ba 的地球化学特征[J]. 现代地质, 2010, 24(3): 560-569.
- [27] TIAN Z L, CHEN S Y, LONG A M. A review on barium as a geochemical proxy to reconstruct paleoproductivity[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2004, 23(3): 78-86. 田正隆, 陈绍勇, 龙爱民. 以 Ba 为指标反演海洋古生产力的研究进展[J]. 热带海洋学报, 2004, 23(3): 78-86.
- [28] ZACHARA J M, FREDRICK J K, SMITH S C, et al. Solubilization of Fe(III) oxide-bound trace metals by a dissimilatory Fe(III) reducing bacterium[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(1): 75-93.

Enrichment Characteristics and Influencing Factors of Various Metal Elements in the Surface Sediments of Subarctic Areas

HAN Tong-zhu^{1,2}, ZHENG Xiao-ling^{1,2}, TENG Fang^{1,2}, CHEN Jun-hui^{1,2}, WANG Bao-dong^{1,2}

(1. *The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;*

2. *Key laboratory for Marine bioactive substances and modern analytical Technology, SOA, Qingdao 266061, China*)

Abstract: The concentrations of thirteen metal elements (Fe, Mn, Al, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, Cr, Ba, Ag, Pb and U) in the surface sediments of subarctic areas including the Bering Sea, the Chukchi Sea and the Canada Basin are determined by using inductively coupled plasma mass spectrometer (ICP-MS), and the factors influencing the metal elements in the surface sediments are discussed by means of factor analysis and enrichment factor (EF) analysis. The results show that the concentrations of Co, Ni, Cu, Zn, Cr, Ba, Ag, Fe, Mn, Al and Pb in the surface sediments are higher in the Chukchi Sea and the Canada Basin and relatively lower in the northern part of the Bering Sea. The concentrations of U and Cd are higher mainly in the northern Chukchi Sea and tend to decrease gradually toward the Canada Basin. The EF analysis indicates that Fe, Mn, Cu, Ag, Ba, Co, Ni and Pb are not enriched in the sediments of the study areas, while Cr, Cd, Zn and U are mildly enriched. The clustering results of the metal elements obtained through the factor analysis are consistent with the distinguishing results of the metal element enrichment degree calculated through the EF analysis. It is, therefore, considered that Al, Mn, Co, Ni, Ag and Pb are probably affected mainly by the weathering of land rocks and soils; Cr, Cd and U mainly by the terrigenous input and the human activities; Ba mainly by the biological activities; and Fe and Zn not only by the natural and anthropogenic sources, but also by the biological activities. The human activity is a major reason for the enrichment of metal elements in the sediments of the subarctic areas.

Key words: metal elements; sediments; distribution; factor analysis; Arctic

Received: November 14, 2017